

機関番号：82405

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760686

研究課題名（和文） 最終処分場の適正管理のための廃棄物の電気的特性評価方法の確立

研究課題名（英文）

Estimation of electrical characteristic of wastes for landfill management

研究代表者

磯部 友護 (ISOBE YUGO)

埼玉県環境科学国際センター・資源循環・廃棄物担当・主任

研究者番号：50415387

研究成果の概要（和文）：廃棄物最終処分場の適正な維持管理支援のため、処分場内部の空間的調査方法の確立が求められている。本研究では、非破壊で地下構造を推定できる比抵抗探査による処分場調査とボーリングコアの物性調査を行った。その結果、処分場における最終覆土層と廃棄物層の内部構造を可視化でき、廃棄物の電気伝導率と間隙率が比抵抗値に影響していることが明らかにされた。また、本調査方法は不法投棄現場における投棄エリアを可視化することができ有用性の高いものであることが示された。

研究成果の概要（英文）：An establishment of spatial survey method for support of landfill management is needed. In this study, we used the electrical resistivity tomography (ERT) method for estimation of landfill underground condition. In addition, physicochemical properties of wastes were measured for estimation of resistivity values. We demonstrated that ERT could visualize the final cover soil layer and waste dumped layer, and that an electrical conductivity and porosity of waste contributed to resistivity values. Furthermore, ERT was usable method for visualize of dumped waste at an illegal dumping site.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：廃棄物工学

科研費の分科・細目：総合工学・リサイクル工学

キーワード：廃棄物、比抵抗探査、最終処分場

1. 研究開始当初の背景

研究代表者らは、最終処分場（以下、処分場と略記）の安定化を評価するため、また、廃止に向けた維持管理支援のため、以前より処分場内部の観測井戸を設置し内部の水質や発生ガスに関する調査・モニタリングを行ってきた。しかしながら、広大な処分場の全

体を把握するには多数のボーリングが必要になることから、非破壊的に、かつ広範囲を調査できる手法が求められていた。研究代表者は、文部科学省科学技術振興調整費による研究プロジェクト「廃棄物処分場の有害物質の安全・安心保障（平成16～18年度）」への参画を通じ、物理探査の一手法である比抵抗

探査を用いた処分場調査を行ってきた。しかしながら、比抵抗探査によって得られるデータ（比抵抗値）は、埋立廃棄物の種類や物理的・化学的な内部性状や時間的な変質などの様々な因子が総合的に反映された値であり、比抵抗値の定量的な解釈が困難である、という問題点があった。

2. 研究の目的

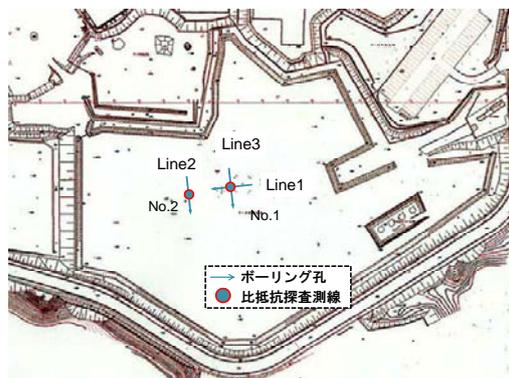
上記の背景を踏まえ、本研究では、処分場での比抵抗探査結果の定量的解釈方法の確立を最終目的とした研究の全体計画における基礎的検討として、処分場での比抵抗探査モニタリングや室内実験による廃棄物の比抵抗値測定を行い、比抵抗値に影響を与える因子を把握することを目的とした。さらに、不法投棄現場において、比抵抗探査による調査に加え電磁（EM）探査を行い、埋立地内部の調査における複数手法の併用による有効性の向上評価を行った。

3. 研究の方法

(1) 処分場における比抵抗探査

本研究では、埼玉県内の管理型処分場を調査対象とした。埋立廃棄物は一般廃棄物、産業廃棄物を対象としており主に焼却灰、不燃残さ、燃え殻、中間処理残さ、がれき類等であり、埋立地面積が47,000m²、埋立容積が440,000m³となっている。

対象処分場において比抵抗探査を実施した。後述するボーリング位置を通過するように、電極間隔1m、測線長47mの探査測線を3本（Line1～3）設置した（図1）。探査にはSYSCAL



1 処分場平面図

PRO(IRIS社)を用いダイポール・ダイポール法を用いた。探査により得られた見掛け比抵抗値から比抵抗モデルを求めるために、RES2DINV(Geotomo社)を用いて有限要素法による逆解析(解析深度:9m)を行い、地下鉛直方向における2次元比抵抗構造断面図を求めた。また、時間変化を観察するために2010.2と2010.10にモニタリングを行った。

(2) ボーリングコアの分析

比抵抗探査の実施後、埋立廃棄物を採取す

るためボーリング調査を2地点(No.1、2)で行った。掘削方法は無水掘削によるオールコアボーリングとし、掘削口径がφ86mm、掘削深度はそれぞれ14m、15mとした。掘削孔は底部より8mをスクリーン管とした観測井戸(井戸径φ50mm)仕立てとした。ボーリングコアは目視観察と各深度で土壤貫入式の電気伝導率(EC)計(Spectrum社)による現場でのEC深度プロファイル測定により、覆土層と廃棄物層に分類した。ボーリングコアから採土器を用い物性測定のための試料採取を行った。各深度において100mLの円筒管に試料をNo.1、2でそれぞれ28、26個採取した。採取後の試料はパラフィルムで乾燥防止措置を行ったのち実験室に持ち帰った。各試料は重量測定、デジタル実容積計(大起理化学工業)を用いた固相、液相、気相の三相分析を行った後、105℃で恒量値になるまで乾燥し再び重量を測定した。これらの測定結果から各物性値(間隙率、含水率、水分飽和度、実比重等)を算出した。また、乾燥後の試料は振動篩い器を用いて篩い分け(>2mm、2~1mm、1~0.5mm、<0.5mm)を行い、粒度分布を求めた。

(3) ボックスモデルを用いた比抵抗値の室内測定方法の開発

採取した廃棄物試料の比抵抗値を実験的に測定することができれば、試料の含水率や間隙率などの物性値を意図的に変化させた場合の比抵抗値の変化追跡などが可能になり、現場での比抵抗探査結果の解釈精度の向上にも寄与できると考えられる。岩石や土質試料やそれらのボーリングコアの比抵抗値を測定した事例はみられるが、廃棄物試料の測定はないことから、室内測定方法の開発を行った。

試料量に合わせて10×15×10cm、もしくは7×12×7cmの亚克力製ボックスを用いた。両端の内壁には通電電極(C1、C2)として銅版を貼付し、電位測定電極(P1、P2)として銅線を内壁に貼付した(図2)。このとき

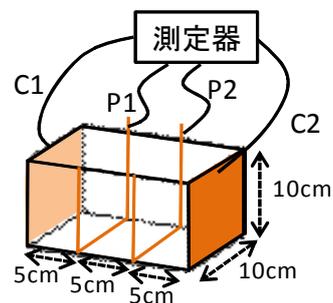


図2 ボックスモデル概略

C1-P1-P2-C2電極間の距離は同じになるようにした。試料を充填した後、比抵抗値測定器(miniOHM、応用地質株)によって定電流の通電したときの電位を測定し比抵抗値を求めた。

また、少量の試料でも比抵抗値が測定できるよう、内容量 50mL の円筒形シリンジ（ポリプロピレン製、内径 3 cm φ）に通電電極に銅版メッシュを、電位測定電極にステンレス棒を取り付けたモデルも作成したが、廃棄物試料を充填し水分添加を行ったところ、水みちが形成され内部の均一性が十分に確保できないことから、本研究では検討対象から除外した。

模擬試料を充填したボックスモデルを用い物性値（パラメータ）変化による比抵抗値の変化傾向の把握を行った。模擬試料には 4mm φ と 0.4mm φ のガラスビーズを等量混合したものを用いた。対象としたパラメータは、含水率、間隙水の EC 値、温度とした。含水率は、蒸留水の添加量により変化させ、間隙水の EC は塩化ナトリウム溶液の濃度により変化させた。また、処分場では埋立廃棄物の好気分解や嫌気分解にともなう発酵熱による温度上昇がみられることから、温度変化も対象パラメータとし、恒温槽内でボックスモデル全体の温度を変化させ比抵抗値測定を行った。

(4) 不法投棄現場での比抵抗探査

埼玉県内で窒化アルミニウムを多量に含有するアルミ精錬灰が地中に不法投棄された事案をケーススタディとして、比抵抗探査と EM 探査を併用し、埋設エリアの推定を行った。対象となった現場は宅地領域にある空き地の一部であり敷地面積は約 130m² であり、行為者へのヒアリング調査より投棄エリアの推定が行われた（図 3）。地表面（水平）方

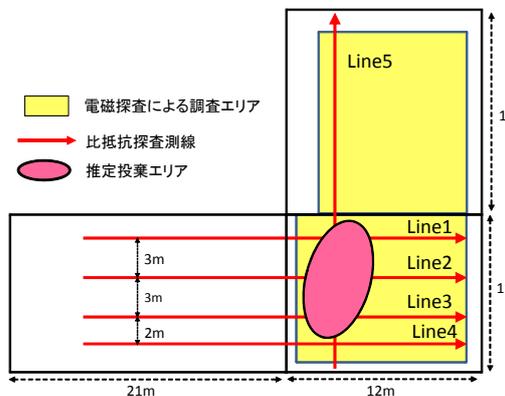


図 3 不法投棄現場平面図

向の伝導率分布を求めるために、推定投棄エリアの全域において EM 探査を行った。探査には EMP-400 (GSSI 社) を用い、異なる周波数 (16000、12000、8000、4000、2000、1000Hz) による地中への電流送信を行い、各周波数ごとの応答より伝導率を求め、各周波数の到達深度における電気伝導率の平面分布を求めた。次に、深度（鉛直）方向の比抵抗分布を求めるために比抵抗探査を行った。推定投棄エリアを通過するように複数の探査側線 (L1

～5) を設置し、(1) と同様の測定・解析手法で比抵抗探査を行った。

探査結果と行為者へのヒアリング調査結果をもとに投棄エリアの推定を行い、推定投棄エリアにおいてバックホーによる投棄廃棄物の掘削除去と、土壌による埋戻しが行われた。埋戻し終了後、再度、比抵抗探査を行い、掘削除去前後の比抵抗値の変化を求めた。

4. 研究成果

(1) 処分場における比抵抗探査

比抵抗探査の結果の一例として図 4 に L2 における比抵抗構造断面図を示す。いずれの

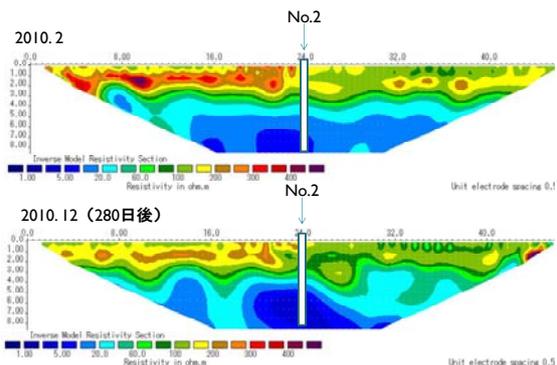


図 4 L2 における比抵抗構造断面図

測線においても地表面(0m)から最終覆土層がある深度約 2.5m までは比抵抗値が 67～194 Ω・m と高い値を示したのに対し、それより深い廃棄物層からは比抵抗値が低くなり 5m 以深では 10 Ω・m 以下と明瞭な差が現れた。現場で測定した EC の深度プロファイルも同様な差異が確認されており、最終覆土層と廃棄物層では比抵抗値の違いによる可視化が可能であることが示された。他方、ボーリングコアの目視観察記録より、中間覆土層もしくは即日覆土層の存在が確認されたが、比抵抗値においてはその前後にある廃棄物層との差異は確認されなかった。この原因として、確認された覆土層の厚さはいずれも 10～30cm であり、本研究において設置した電極間隔よりも小さいことから、比抵抗探査では検出できなかったためと考えられた。また、同一測線でのモニタリング結果をみると、廃棄物層では比抵抗値に大きな変化は見られず、1 年間という短期間では廃棄物層の大きな変質はなかったと考えられた。しかしながら、探査直前に降雨があった 2 回目の探査結果では最終覆土層の比抵抗値が低下する傾向が示された。これは、雨水浸透による最終覆土層の含水率の増加によるものであると考えられ、モニタリングによる変化の可視化が可能であることが明らかとなった。今後、中～長期のモニタリングを継続することにより、安定化や洗い出し作用による廃棄物層の変質も比抵抗探査で捉えられ、定量的解釈

に寄与できると考えられた。

(2) ボーリングコアの物性値と比抵抗値との比較

比抵抗構造断面図から求められたボーリング地点における比抵抗値に対し、ボーリングコアの EC 値を両対数プロットしたところ逆相関($R^2=0.61$)を有することが示され(図 5)、さらに廃棄物層では低比抵抗側に偏在していたことから、EC 値の深度プロファイルと

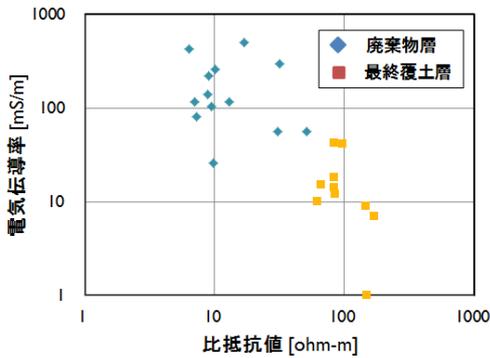


図 5 比抵抗値とボーリングコア EC 値

比抵抗構造断面図が調和的であることが示唆された。また、掘削から 7 日後(外気温 5°C)に観測井戸の内部温度を測定した結果においても、最終覆土層では外気温の影響を受けていたが廃棄物層では温度上昇が見られた(図 6)。温度の上昇にともない比抵抗値は低

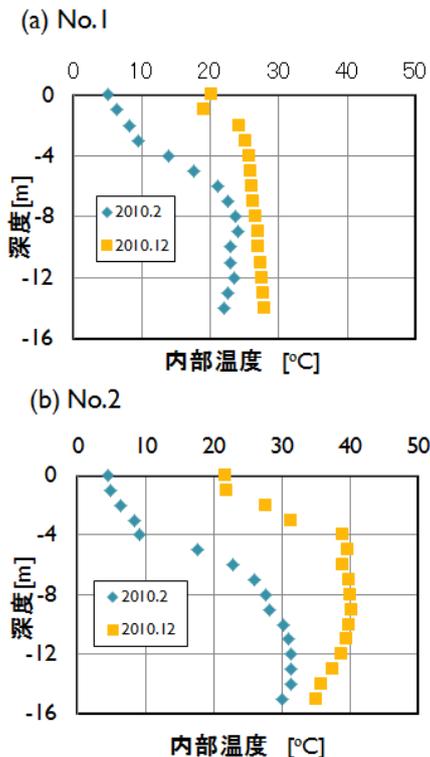


図 6 観測井戸における内部温度

下することが、後述するボックスモデル実験の結果からも明らかとなっていることから、廃棄物層における低比抵抗領域は温度影響を受けている可能性が示唆された。ここで、No.1 に比べ No.2 の内部温度が高くなっているが、No.2 より約 4m 離れた位置に底部集排水管に連結したガス抜き管があり、ポータブルガスモニター (GA-2000、Geotechnical Instruments) で孔内ガス濃度を測定したところ No.1、2 の孔内酸素濃度はそれぞれ 0.3、20.2%を示した。このことから、No.2 では空気流入が起きやすく、内部活性による温度上昇が顕著になったと考えられた。

ボーリングコアの平均水分飽和度は覆土層(最終覆土層と中間覆土層)及び廃棄物層でそれぞれ 36.2%($n=18$, $RSD=\pm 34.9\%$)、36.6%($n=36$, $RSD=\pm 38.7\%$)と不飽和を示した。実際、観測井戸設置から 7 日後における水位は No.1、2 でそれぞれ GL から -12.02、-14.76m であり、その後も水位上昇は見られなかったことから、水分の内部貯留は発生していないことが確認された。このように平均水分飽和度は覆土層と廃棄物層とで差異は見られなかったが、三相分析より求められた水分飽和度と含水率とをプロットすると覆土層と廃棄物層で傾きが異なる正相関がそれぞれ得られ($R^2=0.88$, 0.72)、両層の質的相違を表すことができることが明らかにされた(図 7)。岩石の比抵抗測定を説明する経験

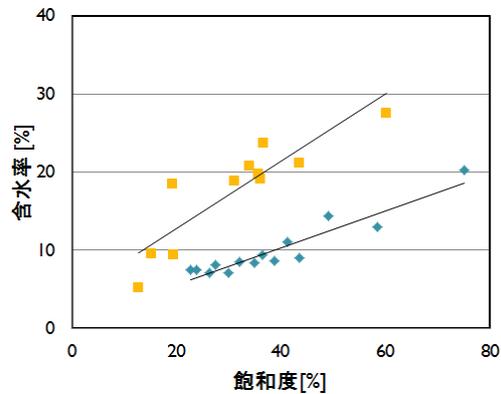


図 7 飽和度と含水率との相関

式としてアーチーの式があり、比抵抗値は間隙水の EC、水分飽和度と間隙率をパラメータとして表すことができる。本研究では基礎検討として、水分飽和度と間隙率のそれぞれについて比抵抗値との関連を調べた。これより、水分飽和度と比抵抗値には明瞭な相関関係は見られなかったが、他方、間隙率では片対数プロットすることにより相関($R^2=0.46$)が見られた(図 8)。これより、廃棄物試料においても間隙率が比抵抗値に影響を与える重要な因子であることが明らかにされた。また、粒度分布と比抵抗値には相関が見られな

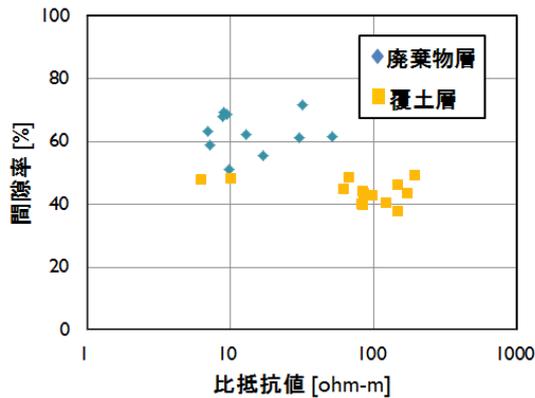


図 8 間隙率と比抵抗値との相関

かった。埋立層の間隙率に関与する要因として粒度分布と埋立時の締固め量が考えられるが、前者による影響は小さいと示唆された。

(3) ボックスモデル実験による比抵抗値測定

模擬試料を用いたボックスモデル実験の結果を図 9 に示す。これより、水分添加量の増加によって比抵抗値は低下し、特に添加量

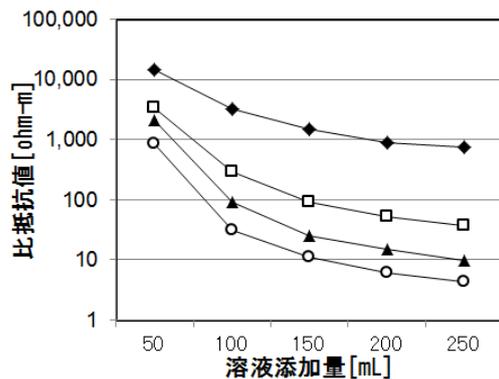


図 9 模擬試料によるボックスモデル試験
塩化ナトリウム濃度 ◆ : 0.00%、□ : 0.25%、▲ : 1.00%、○ : 2.50%

の少ない不飽和条件下においてその変動が大きい傾向が示された。他方、間隙水の塩化ナトリウム溶液濃度が 0% から 0.25% に増加するだけで比抵抗値は急激な低下が見られ、水分添加量 50mL 時においては、14500 Ωm から 3400 Ωm と 75% 以上の変化率を示した。この比抵抗値の変化率は、水分添加による変化よりも大きかったことから、廃棄物試料の比抵抗値変化を評価する場合、含水率よりも間隙水の EC 値による寄与が大きいと推定された。また、温度変化に伴う比抵抗値の変化を求めたところ、温度上昇に伴い比抵抗値は低下することが確認され (図 10)、その傾向は含水率が低いほど顕著であった。このことから含水率が少ない処分場での比抵抗値探索においては内部温度による影響を考慮する必要があると示唆された。しかしながら、多雨な日本の処分場、特に管理型処分場においては雨水

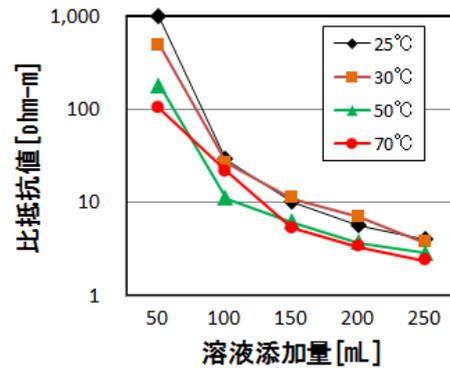


図 10 ボックスモデル試験における温度影響 (塩化ナトリウム濃度 1%)

を浸透させる準好気型を採用していることが多く、廃棄物層の含水率は高いものと考えられることから、上述したように間隙水の EC 値による影響が大きいと考えられ、処分場の比抵抗値探索においては間隙水や浸出水の EC 値の考慮が不可欠であることが明らかとなった。

(4) 不法投棄現場での比抵抗値探索

EM 探索によって得られた各周波数のうち 16000、8000、2000Hz における電気伝導率の平面分布を図 11 に示す。周波数が低いほど

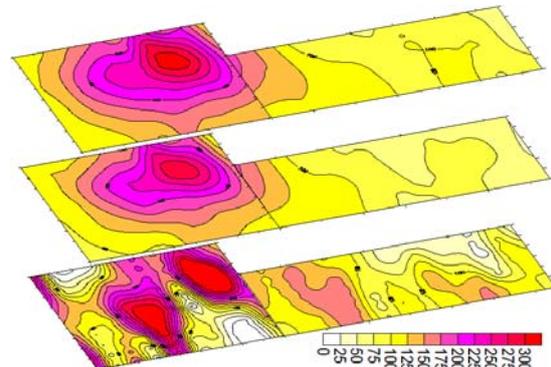


図 11 EM 探索による電気伝導率の水平分布
※上から 16000、8000、2000Hz の電流送信時における値 (単位: mS/m)。周波数が低いほど到達深度は深くなるが探索原理の特性上、絶対深度は特定できない。

より深い深度を表している。これより、推定投棄エリアにおいて、円形状の高い伝導率領域が確認され、他方、投棄されていないエリア (図の右側部分) では低い伝導率が広く分布する結果となった。また、最も到達深度の深い周波数である 2000Hz では他の周波数における電気伝導率分布とは異なる傾向を示したが、これは投棄された深度よりも深い原地盤や廃棄物層と接触した高 EC 値の地下水に起因するものと考えられた。

次に各探索側線における比抵抗値探索の結果の一例として L1、2、5 における比抵抗値構造断面図を図 12 に示す。これより、推定投

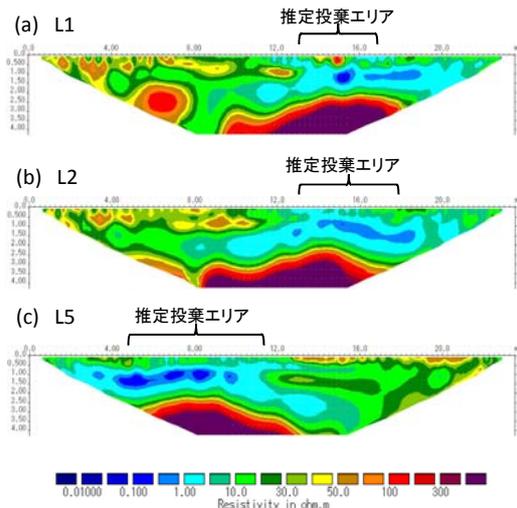


図 12 比抵抗探査による各測線の比抵抗構造断面図

棄エリアは投棄されていないエリアに比べて比抵抗値が低い結果となり、EM 探査の結果と調和的であることが示された。深度方向の分布をみると、推定投棄エリアでは地表面から深さ約 2.5m まで低比抵抗領域が存在し、それより深いところでは比抵抗値が上昇する結果となった。このことから推定投棄エリアにおける投棄深度は約 2.5m であることが示唆された。掘削除去の際、投棄深度を確認したところ 2~3m であったことから、比抵抗探査によって投棄深度を精度良く推定できることが示された。また、掘削除去前後の比抵抗探査モニタリングを行った結果、投棄エリアにおいて変化率が上昇することが確認され (図 13)、投棄廃棄物から土壌への埋設物の材質の変化が比抵抗値の変化で可視化できることが示された。

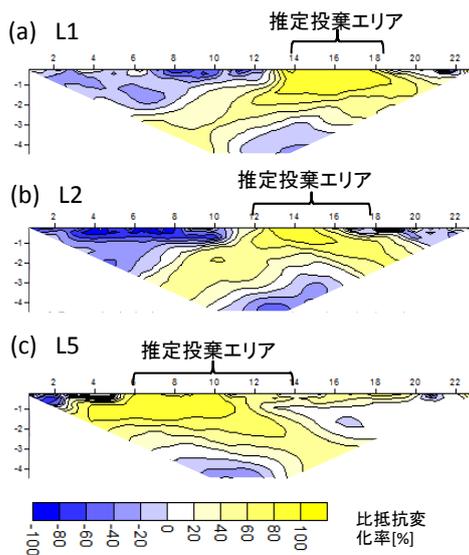


図 13 掘削除去前後の比抵抗探査による比抵抗変化率

(5) まとめ

本研究によって以下のことが明らかとなった。

- ・処分場での比抵抗探査モニタリングによって降雨による質的变化を把握できる
- ・中～長期間の比抵抗探査モニタリングによって廃棄物層の安定化や洗い出し作用等の質的变化を把握できる可能性がある
- ・比抵抗探査を行った地点のボーリングコアの電気伝導率は比抵抗値と相関がある
- ・間隙率が比抵抗値に影響を与える重要な因子である
- ・間隙水の EC や含水率も比抵抗値に影響を与える因子である
- ・比抵抗探査と EM 探査の併用により、地下状況をより空間的に可視化できる

以上より、処分場における埋立層の間隙率、含水率や、間隙水 (または浸出水) の EC 値が比抵抗値に影響を与える因子であることが明らかとなり、岩石の比抵抗値をこれらの因子で表すアーチー式が廃棄物試料にも適用できる可能性が示された。今後、処分場での比抵抗探査モニタリングを継続するとともに、さまざまな廃棄物試料における物性値と比抵抗値の測定データを蓄積し、廃棄物試料の比抵抗値の定式化につなげることにより、本研究の最終目的である比抵抗探査の定量的解釈方法が確立されるものと考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 3 件)

- ① 磯部友護、最終処分場での比抵抗探査における埋立廃棄物の影響評価に関する研究、第 20 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2009.9)
- ② Y. Isobe, M. Kawasaki, K. Suzuki, K. Sasaka, and Y. Watanabe、Electrical imaging of the illegal dumping site using electrical resistivity tomography and electromagnetic sounding、The 6th Asian-Pacific Landfill Symposium (2010.10)
- ③ 磯部友護、川寄幹生、鈴木和将、渡辺洋一、埋立廃棄物の物理的・化学的な物性を影響因子とした比抵抗探査の評価、第 32 回 全国都市清掃研究・事例発表会発表 (2011.1)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

磯部 友護 (ISOBE YUGO)

埼玉県環境科学国際センター 資源循環・廃棄物担当 主任

研究者番号 : 50415387